

**EVALUASI DAN KALIBRASI MUSIMAN SEVERE WEATHER THREAT (SWEAT)
INDEX TERHADAP KEJADIAN *THUNDERSTORM* DI BANDAR UDARA
I GUSTI NGURAH RAI**

**SEASONAL EVALUATION AND CALIBRATION OF THE SEVERE WEATHER
THREAT (SWEAT) INDEX FOR THUNDERSTORM EVENTS AT I GUSTI
NGURAH RAI AIRPORT**

Muhammad Jouhar Syah, Program Studi Meteorologi, Sekolah Tinggi Meteorologi
Klimatologi dan Geofisika, Indonesia

Muhammad Zaidan Hakim, Program Studi Meteorologi, Sekolah Tinggi Meteorologi
Klimatologi dan Geofisika, Indonesia

Yosafat Donni Haryanto*, Program Studi Meteorologi, Sekolah Tinggi Meteorologi
Klimatologi dan Geofisika, Indonesia

I Kadek Mas Satriyabawa, Stasiun Meteorologi Kelas I Gusti Ngurah Rai, Bandara Ngurah
Rai, Indonesia

La Ode Ashamad Nusriah, Program Studi Meteorologi, Sekolah Tinggi Meteorologi
Klimatologi dan Geofisika, Indonesia

*e-mail: yosafat.haryanto@stmkg.ac.id (corresponding author)

Abstrak. *Thunderstorm* merupakan fenomena cuaca ekstrem yang berpotensi mengganggu keselamatan penerbangan, khususnya di wilayah tropis maritim. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja *Severe Weather Threat* (SWEAT) Index dalam mendeteksi kejadian *thunderstorm* di Bandar Udara I Gusti Ngurah Rai serta menentukan *threshold* SWEAT yang adaptif secara musiman. Data yang digunakan meliputi pengamatan radiosonde pada pukul 00 dan 12 UTC serta observasi cuaca permukaan tahun 2025. Evaluasi dilakukan menggunakan verifikasi tabel kontingensi dengan parameter *Probability of Detection* (POD), *False Alarm Ratio* (FAR), dan *Critical Success Index* (CSI), serta analisis *Receiver Operating Characteristic* (ROC). Hasil menunjukkan bahwa frekuensi *thunderstorm* tertinggi terjadi pada musim hujan (25,4%), disertai nilai SWEAT rata-rata dan maksimum yang lebih tinggi dibandingkan musim kemarau. Penggunaan satu *threshold* SWEAT sepanjang tahun menunjukkan kinerja rendah, terutama pada musim hujan dengan FAR tinggi dan CSI rendah. Pendekatan kategorial menunjukkan bahwa kategori menengah lebih representatif pada musim hujan, sedangkan kategori tinggi lebih optimal pada musim kemarau. Analisis ROC menunjukkan kemampuan diskriminatif yang baik pada musim kemarau ($AUC \approx 0,83$), tetapi lebih terbatas pada musim hujan. Kalibrasi dan validasi internal menghasilkan *threshold* optimal sekitar 180 pada musim hujan dan 230 pada musim kemarau. Hasil ini menegaskan pentingnya *threshold* SWEAT adaptif musiman untuk meningkatkan akurasi deteksi *thunderstorm* di wilayah tropis maritim.

Kata Kunci: *Thunderstorm, SWEAT Index, Threshold Musiman, Meteorologi Penerbangan, Tropis Maritim.*

Abstract. *Thunderstorms are extreme weather phenomena that can compromise aviation safety, particularly in maritime tropical regions. This study aims to evaluate the performance of the Severe Weather Threat (SWEAT) Index in detecting thunderstorms at I Gusti Ngurah Rai Airport and to determine seasonally adaptive SWEAT thresholds. The data utilized include 00 and 12 UTC radiosonde soundings and surface weather observations from 2025. Evaluation was conducted using contingency table verification—incorporating the Probability of Detection (POD), False Alarm Ratio (FAR), and Critical Success Index (CSI)—alongside Receiver Operating Characteristic (ROC) analysis. The results indicate that the highest frequency of thunderstorms occurs during the rainy season (25.4%), characterized by higher average and maximum SWEAT values compared to the dry season. Applying a single, year-round SWEAT threshold yields poor performance, especially during the rainy season, as evidenced by a high FAR and a low CSI. A categorical approach reveals that the "medium" category is more representative during the rainy season, whereas the "high" category is more optimal during the dry season. ROC analysis demonstrates good discriminative ability during the dry season ($AUC \approx 0.83$), though this is more limited during the rainy season. Internal calibration and validation suggest optimal thresholds of approximately 180 for the rainy season and 230 for the dry season. These findings underscore the importance of employing seasonally adaptive SWEAT thresholds to enhance the accuracy of thunderstorm detection in maritime tropical regions.*

Keywords: *Thunderstorm, SWEAT Index, Seasonal Threshold, Aviation Meteorology, Maritime Tropics.*

PENDAHULUAN

Fenomena cuaca ekstrem merupakan salah satu faktor lingkungan yang memiliki pengaruh signifikan terhadap berbagai sektor aktivitas manusia, khususnya sektor transportasi udara. Fenomena cuaca ekstrem berupa *thunderstorm* merupakan salah satu kejadian meteorologis yang dominan di wilayah tropis, termasuk Indonesia, sebagai akibat dari intensitas radiasi matahari yang tinggi dan proses konveksi atmosfer yang aktif sepanjang tahun (Fadholi, 2012). Pertumbuhan awan cumulonimbus yang intens sering memicu hujan lebat, angin kencang, turbulensi, aktivitas petir, serta penurunan jarak pandang secara signifikan. Kondisi tersebut secara langsung meningkatkan risiko keselamatan penerbangan, khususnya pada fase kritis lepas landas dan pendaratan. Dalam operasional transportasi udara, cuaca buruk tercatat sebagai faktor utama penyebab gangguan seperti delay, divert, go around, hingga pembatalan penerbangan. Oleh karena itu, sistem peringatan dini yang akurat dan berbasis data ilmiah menjadi kebutuhan esensial dalam mendukung keselamatan penerbangan (Rusdin dkk., 2023).

Indonesia sebagai wilayah maritim tropis memiliki frekuensi *thunderstorm* yang tinggi dan relatif merata sepanjang tahun, terutama di sekitar bandara yang berada di kawasan pesisir (Tjasyono dkk., 2011). Karakter atmosfer yang lembap dan tidak stabil menjadikan wilayah ini sangat rentan terhadap pembentukan awan konvektif skala lokal hingga mesoskal (Yulihastin dkk., 2023). Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa data pengamatan udara atas dari radiosonde dapat dimanfaatkan untuk menghitung indeks stabilitas atmosfer sebagai dasar prakiraan *thunderstorm* (Budiarti dkk., 2012). Salah satu indeks yang banyak digunakan adalah Severe Weather Threat (SWEAT) Index, yang mengintegrasikan parameter termodinamika dan dinamika atmosfer pada lapisan tertentu (Miller, 1972). Studi di Bandara Sultan Iskandar Muda Banda Aceh menunjukkan bahwa nilai SWEAT meningkat pada kategori sedang hingga kuat menjelang kejadian hujan disertai badai guntur, sehingga indeks ini dinilai relevan untuk keselamatan penerbangan (N. A.-Z. Lubis dkk., 2020).

Berbagai penelitian terdahulu telah mengkaji penerapan SWEAT Index untuk analisis potensi *thunderstorm* di beberapa bandara di Indonesia. (Nugraha dkk., 2021) menunjukkan bahwa nilai SWEAT yang melampaui ambang tertentu berkorelasi kuat dengan meningkatnya peluang kejadian *thunderstorm* di Stasiun Meteorologi Supadio. (Rusdin dkk., 2023) juga menemukan bahwa SWEAT Index memiliki tingkat akurasi yang cukup baik dalam memprediksi *thunderstorm* dan awan cumulonimbus di Bandara Sultan Hasanuddin, meskipun performanya berfluktuasi secara temporal. Selain itu, (N. Lubis, 2024) melalui pendekatan Analytical Hierarchy Process menegaskan peran SWEAT Index sebagai indikator penting dalam sistem pendukung keputusan prakiraan cuaca penerbangan. Hasil-hasil tersebut mengindikasikan bahwa SWEAT Index memiliki potensi operasional yang signifikan dalam meteorologi penerbangan di wilayah tropis.

Meskipun efektivitas SWEAT Index telah banyak dibuktikan, sebagian besar penelitian masih terbatas pada lokasi bandara tertentu dengan karakter geografis yang relatif homogen (Nugraha dkk., 2021). Penerapan indeks ini pada wilayah dengan kondisi klimatologis berbeda, khususnya bandara pesisir tropis, masih relatif terbatas (Rusdin dkk., 2023). Selain itu, beberapa studi cenderung mengombinasikan SWEAT Index dengan indeks stabilitas lain tanpa mengevaluasi kontribusi SWEAT secara mandiri sebagai indikator utama *thunderstorm* (Budiarti dkk., 2012). Variasi ambang batas nilai SWEAT antar wilayah juga belum terstandarisasi sehingga hasil prakiraan bersifat lokal dan belum sepenuhnya konsisten. Kondisi ini menegaskan perlunya kajian lanjutan berbasis data jangka panjang dan analisis kuantitatif yang lebih spesifik (Organization, 2018)

Berdasarkan kondisi tersebut, diperlukan penelitian lanjutan yang secara kuantitatif mengkaji potensi *thunderstorm* berbasis SWEAT Index di bandara lain dengan intensitas penerbangan tinggi dan kerentanan cuaca signifikan, seperti Bandar Udara I Gusti Ngurah Rai. Bandara ini berada di wilayah pesisir tropis dengan pengaruh laut yang kuat terhadap dinamika atmosfer lokal dan proses konveksi harian (Tjasyono dkk., 2011). Penelitian ini diharapkan mampu memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai karakteristik SWEAT Index pada lingkungan tropis maritim. Hasil penelitian juga diharapkan meningkatkan akurasi prakiraan cuaca penerbangan berbasis indeks stabilitas atmosfer. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya mengisi gap penelitian sebelumnya, tetapi juga berkontribusi pada penguatan dasar ilmiah meteorologi penerbangan di Indonesia.

METODE

Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif–analitik untuk mengevaluasi kinerja kategori nilai Severe Weather Threat (SWEAT) Index dalam memprediksi kejadian *thunderstorm* di wilayah Bandar Udara I Gusti Ngurah Rai. Pendekatan kategorial diterapkan karena SWEAT Index merupakan indeks kontinu yang merepresentasikan tingkat probabilitas terjadinya cuaca konvektif, sehingga interpretasi berbasis kelas nilai dinilai lebih representatif dibandingkan penggunaan satu ambang batas tunggal, khususnya pada wilayah tropis maritim yang memiliki dinamika atmosfer tinggi (Miller, 1972; Rusdin dkk., 2023).. Analisis dilakukan dengan membandingkan kinerja setiap kategori SWEAT Index terhadap kejadian *thunderstorm* aktual berdasarkan data observasi cuaca permukaan.

Lokasi dan Periode Penelitian

Penelitian dilaksanakan di wilayah Bandar Udara I Gusti Ngurah Rai yang terletak di kawasan pesisir selatan Pulau Bali. Wilayah ini memiliki karakteristik atmosfer tropis maritim dengan pengaruh laut yang kuat terhadap proses konveksi harian serta intensitas lalu lintas

penerbangan yang tinggi, sehingga rentan terhadap gangguan cuaca konvektif (Tjasyono dkk., 2011). Periode penelitian mencakup rentang waktu tertentu yang disesuaikan dengan ketersediaan data radiosonde dan data observasi cuaca permukaan, dengan tujuan merepresentasikan variasi temporal dan musiman kejadian *thunderstrom* (Nugraha dkk., 2021).

Sumber dan Jenis Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder yang terdiri atas data radiosonde dan data observasi cuaca permukaan. Rincian sumber dan jenis data disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Sumber dan Jenis Data Penelitian

Jenis Data	Parameter	Resolusi Waktu	Kegunaan
Radiosonde	Suhu udara, suhu titik embun, arah dan kecepatan angin (850 dan 500 mb)	00Z dan 12Z	Perhitungan SWEAT Index
METAR	Hujan, petir, awan cumulonimbus	Jam-an	Identifikasi kejadian <i>thunderstrom</i>

Data radiosonde digunakan sebagai dasar perhitungan SWEAT Index, sedangkan data observasi permukaan digunakan sebagai data pembanding untuk mengidentifikasi kejadian *thunderstrom* aktual (Miller, 1972; N. A.-Z. Lubis dkk., 2020). Seluruh data diperoleh dari stasiun meteorologi berwenang dan mengikuti standar pengamatan meteorologi operasional yang ditetapkan oleh World Meteorological Organization (WMO, 2018).

Teknik Pengumpulan Data

Data radiosonde diperoleh dari hasil pengukuran rutin balon udara yang dilakukan dua kali sehari, yaitu pada pukul 00Z dan 12Z. Data observasi cuaca permukaan dikumpulkan secara periodik dengan resolusi waktu yang memadai untuk mencatat kejadian *thunderstrom* aktual di wilayah bandara. Data yang tidak lengkap, tidak konsisten, atau tidak memenuhi kriteria kualitas pengamatan dieliminasi dari analisis guna menjaga keandalan dan validitas hasil penelitian (Rusdin dkk., 2023).

Teknik Pengolahan Data

Nilai SWEAT Index dihitung dari parameter radiosonde menggunakan persamaan yang dikembangkan oleh Miller (1972), sebagai berikut:

$$\text{SWEAT} = 12T_{d850} + 20(TT - 49) + 2f_{850} + f_{500} + 125(S + 0,2) \quad (1)$$

Keterangan:

- T_{d850} adalah suhu titik embun pada lapisan 850 mb (°C),
- TT adalah *Total Totals Index*,
- f_{850} dan f_{500} adalah kecepatan angin pada lapisan 850 mb dan 500 mb (knot),
- S merupakan fungsi sinus dari selisih arah angin antara lapisan 850 mb dan 500 mb.

Nilai SWEAT Index yang diperoleh selanjutnya dikelompokkan ke dalam beberapa kategori potensi *thunderstrom* sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Kategori SWEAT Index yang Digunakan dalam Penelitian

Kategori SWEAT	Rentang Nilai	Interpretasi Umum
Rendah	< 200	Atmosfer relatif stabil
Sedang	200–239	Potensi konveksi lemah–sedang
Tinggi	240–279	Potensi <i>thunderstorm</i> signifikan
Sangat Tinggi	≥ 280	Potensi cuaca konvektif kuat

Klasifikasi ini mengacu pada praktik penggunaan SWEAT Index dalam penelitian di Indonesia dan disesuaikan dengan distribusi nilai SWEAT di lokasi penelitian agar lebih relevan secara klimatologis dan operasional (N. A.-Z. Lubis dkk., 2020; Nugraha dkk., 2021). Penggunaan klasifikasi tersebut kemudian disesuaikan dengan distribusi nilai SWEAT yang diperoleh di lokasi penelitian agar dapat merepresentasikan karakteristik atmosfer setempat. Penyesuaian ini diharapkan dapat meningkatkan relevansi interpretasi indeks terhadap kondisi klimatologis dan kebutuhan operasional dalam mengidentifikasi potensi terjadinya *thunderstorm*.

Selain perhitungan SWEAT Index dan pengelompokan nilai ke dalam kategori potensi *thunderstorm*, data dalam penelitian ini juga dipilah berdasarkan musim hujan dan musim kemarau. Pemisahan musiman dilakukan untuk menangkap variasi karakteristik atmosfer yang berbeda dalam pembentukan *thunderstorm* di wilayah tropis maritim. Pada musim hujan, proses konveksi umumnya didominasi oleh ketidakstabilan termodinamik dan kandungan uap air yang tinggi, sedangkan pada musim kemarau peran dinamika atmosfer, seperti shear vertikal angin dan pengaruh gangguan sinoptik, menjadi relatif lebih dominan (Tjasyono dkk., 2011; Nugraha dkk., 2021).

Pengelompokan data secara musiman ini bertujuan untuk memastikan bahwa distribusi nilai SWEAT Index dan karakteristik kejadian *thunderstorm* dianalisis secara kontekstual sesuai dengan rezim atmosfer yang berlaku, sehingga hasil evaluasi kinerja indeks menjadi lebih representatif dan tidak terdistorsi oleh perbedaan mekanisme konveksi antar musim.

Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan dengan membandingkan setiap kategori SWEAT Index terhadap kejadian *thunderstorm* aktual berdasarkan data observasi cuaca permukaan. Untuk mengevaluasi kinerja masing-masing kategori, digunakan metode verifikasi berbasis tabel kontingensi dua kategori sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Struktur Tabel Kontingensi Evaluasi Kategori SWEAT

Prediksi / Observasi	<i>Thunderstorm</i>	Non- <i>Thunderstorm</i>
<i>Thunderstorm</i>	Hit (H)	False Alarm (FA)
Non- <i>Thunderstorm</i>	Miss (M)	Correct Negative (CN)

Berdasarkan tabel 3, dihitung nilai *Probability of Detection* (POD), *False Alarm Ratio* (FAR), dan *Critical Success Index* (CSI) untuk setiap kategori SWEAT Index. Nilai CSI digunakan sebagai indikator utama dalam mengevaluasi kinerja kategori SWEAT, di mana kategori dengan nilai CSI lebih tinggi dianggap memiliki kontribusi yang lebih besar dalam merepresentasikan kejadian *thunderstorm* secara operasional. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi kategori SWEAT yang paling informatif tanpa menetapkan satu nilai ambang

absolut, sehingga lebih adaptif terhadap karakteristik atmosfer tropis maritim (Nugraha dkk., 2021; Rusdin dkk., 2023; Ebert dkk., 2013).

Selain evaluasi kinerja berbasis tabel kontingensi dua kategori, penelitian ini juga menerapkan pendekatan evaluasi kontinu terhadap SWEAT Index. Untuk tujuan tersebut, dilakukan analisis *Receiver Operating Characteristic* (ROC) dengan memvariasikan nilai ambang SWEAT Index dan menghitung nilai *Probability of Detection* (POD) serta *False Alarm Ratio* (FAR) pada setiap ambang yang diuji.

Kurva ROC digunakan untuk menilai kemampuan diskriminatif SWEAT Index dalam memisahkan kejadian *thunderstorm* dan *non-thunderstorm* secara menyeluruh. Nilai ambang SWEAT Index yang optimal ditentukan berdasarkan nilai *Critical Success Index* (CSI) maksimum, yang merepresentasikan keseimbangan terbaik antara kemampuan deteksi kejadian *thunderstorm* dan tingkat kesalahan prediksi. Analisis ROC dan penentuan ambang optimal ini dilakukan secara terpisah untuk musim hujan dan musim kemarau, guna menangkap variasi sensitivitas SWEAT Index terhadap dinamika atmosfer musiman (Rusdin dkk., 2023).

Critical Success Index (CSI) dipilih sebagai indikator utama dalam evaluasi kinerja SWEAT Index karena indeks ini mempertimbangkan secara simultan komponen *hit*, *false alarm*, dan *miss*. Pendekatan ini menjadikan CSI lebih representatif untuk mengevaluasi kejadian cuaca jarang seperti *thunderstorm* dibandingkan metrik akurasi keseluruhan yang cenderung bias terhadap dominasi kejadian *non-thunderstorm* (WMO, 2018).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Dataset SWEAT dan Kejadian *Thunderstorm* Tahun 2025

Dataset yang digunakan dalam penelitian ini merupakan hasil integrasi data indeks *Severe Weather Threat* (SWEAT) dari pengamatan radiosonde pada pukul 00 dan 12 UTC dengan data cuaca permukaan METAR tahun 2025. Integrasi dilakukan menggunakan jendela waktu 12 jam untuk mengidentifikasi kejadian *thunderstorm* (TS) setelah waktu pengamatan SWEAT.

Tabel 4. Statistik Dasar Dataset SWEAT dan Kejadian *Thunderstorm* Tahun 2025

Musim	Total Observasi SWEAT Valid	Jumlah Kejadian TS	Frekuensi TS (%)	Rata-rata SWEAT	SWEAT Maksimum
Hujan	252	64	25.4	219.5	316.4
Kemarau	178	10	5.62	181.2	258
Peralihan	104	5	4.81	186.2	251.4

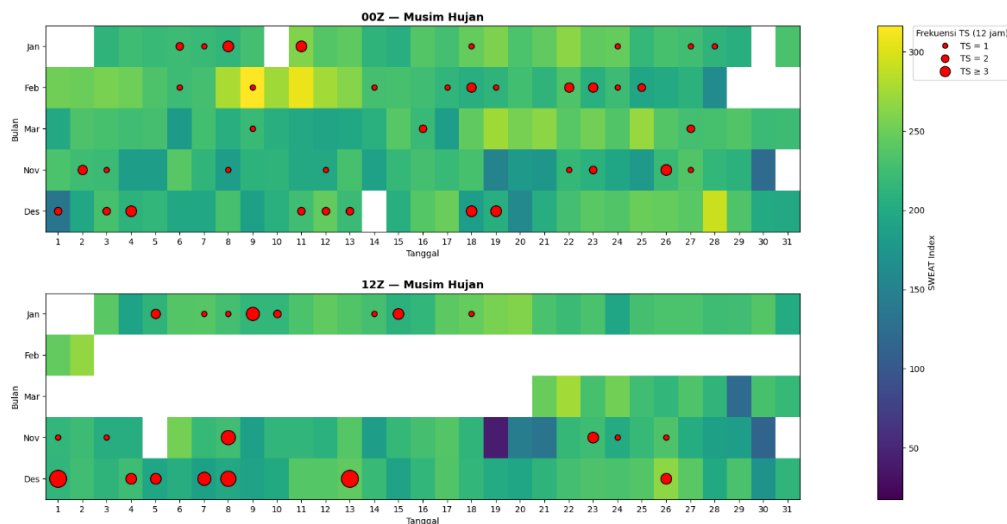
Ringkasan statistik dasar dataset disajikan pada Tabel 4. Jumlah observasi SWEAT valid pada musim hujan tercatat sebanyak 252 data, musim kemarau 178 data, dan musim peralihan 104 data. Frekuensi kejadian TS menunjukkan variasi musiman yang jelas, dengan nilai tertinggi pada musim hujan sebesar 25,4%, diikuti musim kemarau sebesar 5,62% dan musim peralihan sebesar 4,81%.

Nilai rata-rata SWEAT tertinggi juga ditemukan pada musim hujan, yaitu sebesar 219,5 dengan nilai maksimum mencapai 316,4. Sebaliknya, musim kemarau memiliki rata-rata SWEAT yang lebih rendah, yaitu 181,2 dengan nilai maksimum 258. Musim peralihan menunjukkan karakteristik yang berada di antara kedua musim utama tersebut. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa atmosfer pada musim hujan cenderung lebih labil secara termodinamika dibandingkan musim kemarau.

Pola Temporal SWEAT dan Intensitas *Thunderstrom*

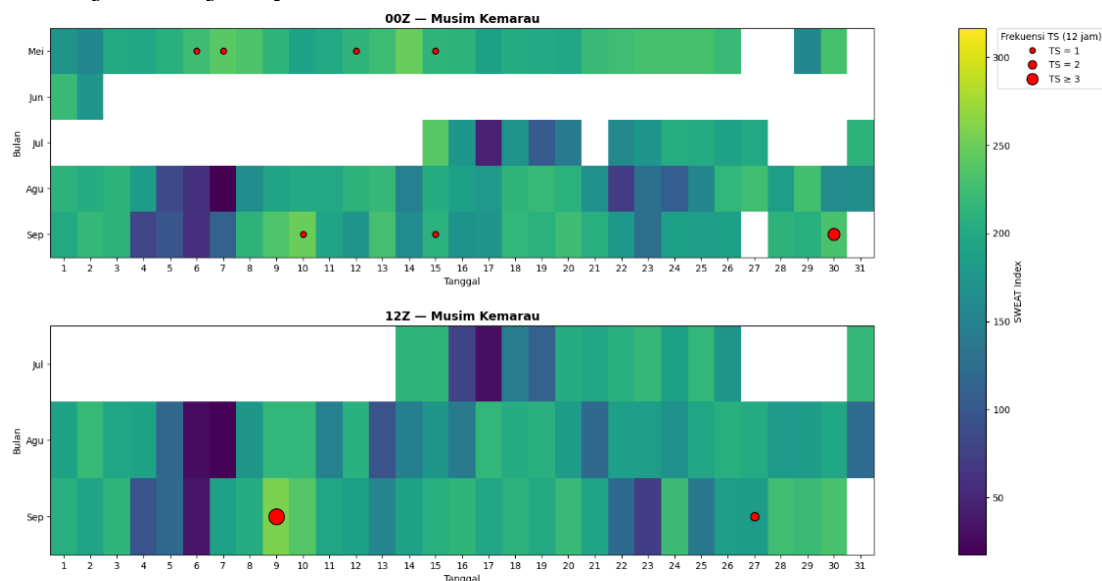
Pola temporal nilai SWEAT dan intensitas TS divisualisasikan dalam bentuk sebaran harian-bulanan pada Gambar 1 untuk musim hujan dan Gambar 2 untuk musim kemarau. Warna latar merepresentasikan besarnya nilai SWEAT, sedangkan simbol lingkaran menunjukkan frekuensi kejadian TS dalam periode 12 jam setelah pengamatan radiosonde.

Pada musim hujan (Gambar 1), nilai SWEAT tinggi muncul lebih sering dan tersebar relatif merata sepanjang bulan Januari hingga Maret serta November hingga Desember. Kejadian TS dengan intensitas lebih dari satu kali dalam periode 12 jam juga lebih banyak ditemukan pada musim ini, terutama ketika SWEAT berada pada kisaran menengah hingga tinggi.



Gambar 1. Sebaran data SWEAT dan Intensitas TS Pada Musim Hujan (00-12 UTC)

Sebaliknya, pada musim kemarau (Gambar 2), nilai SWEAT umumnya berada pada rentang rendah hingga menengah. Kejadian TS bersifat sporadis dan hanya muncul pada hari-hari tertentu, sering kali berasosiasi dengan nilai SWEAT yang relatif lebih tinggi dibandingkan kondisi rata-rata musim kemarau. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun SWEAT merupakan indikator labilitas atmosfer, keberadaan nilai SWEAT tinggi saja tidak selalu menjamin terjadinya *thunderstrom*.



Gambar 2. Sebaran data SWEAT dan Intensitas TS Pada Musim Kemarau (00-12 UTC)

Evaluasi Ambang Tunggal SWEAT terhadap Kejadian *Thunderstorm*

Evaluasi kemampuan SWEAT sebagai indikator kejadian TS menggunakan pendekatan ambang tunggal disajikan pada Tabel 5 (tabel kontingensi biner) dan dirangkum dalam Tabel 6 (nilai POD, FAR, CSI, dan akurasi).

s

Tabel 5. Kontingensi Biner SWEAT terhadap Kejadian *Thunderstorm*

Prediksi \ Observasi (Musim Hujan)	<i>Thunderstorm</i> (TS)	Non- <i>Thunderstorm</i>
TS ($SWEAT \geq threshold$)	Hit (H) = 8	False Alarm (FA) = 37
Non-TS ($SWEAT < threshold$)	Miss (M) = 50	Correct Negative (CN) = 157
Prediksi \ Observasi (Musim Kemarau)	<i>Thunderstorm</i> (TS)	Non- <i>Thunderstorm</i>
TS ($SWEAT \geq threshold$)	Hit (H) = 2	False Alarm (FA) = 1
Non-TS ($SWEAT < threshold$)	Miss (M) = 7	Correct Negative (CN) = 168

Pada musim hujan, hasil verifikasi menunjukkan nilai Probability of Detection (POD) sebesar 0,138, False Alarm Ratio (FAR) sebesar 0,822, dan Critical Success Index (CSI) sebesar 0,084. Nilai FAR yang sangat tinggi mengindikasikan bahwa sebagian besar prediksi TS berbasis ambang SWEAT tidak terkonfirmasi oleh observasi TS, sedangkan nilai POD yang rendah menunjukkan banyak kejadian TS yang tidak terdeteksi.

Tabel 6. Skill Score Verifikasi SWEAT terhadap *Thunderstorm*

Musim	POD	FAR	CSI	Accuracy
Hujan	0.138	0.822	0.084	0.655
Kemarau	0.222	0.333	0.2	0.955

Pada musim kemarau, performa relatif lebih baik dengan nilai CSI sebesar 0,20 dan FAR sebesar 0,333 (Tabel 6). Meskipun demikian, nilai POD masih tergolong rendah. Perbaikan performa pada musim kemarau terutama dipengaruhi oleh jumlah kejadian TS yang lebih sedikit, sehingga peluang terjadinya alarm palsu juga menurun.

Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan satu ambang SWEAT bersifat kurang adaptif terhadap kondisi atmosfer tropis maritim yang sangat variatif, khususnya pada musim hujan.

Evaluasi Kategorial SWEAT terhadap Kejadian *Thunderstorm*

Pendekatan kategorial SWEAT memberikan gambaran yang lebih rinci mengenai hubungan antara tingkat labilitas atmosfer dan kejadian TS. Hasil evaluasi kategorial ditampilkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Kontingensi Kategorial SWEAT terhadap *Thunderstorm*

Kategori SWEAT (Musim Hujan)	H	FA	M	CN	POD	FAR	CSI
Rendah	8	41	50	153	0.138	0.837	0.081
Sedang	42	116	16	78	0.724	0.734	0.241
Tinggi	7	35	51	159	0.121	0.833	0.075
Sangat Tinggi	1	2	57	192	0.017	0.667	0.017

Kategori SWEAT (Musim Kemarau)	H	FA	M	CN	POD	FAR	CSI
Rendah	1	97	8	72	0.111	0.99	0.009
Sedang	6	71	3	98	0.667	0.922	0.075
Tinggi	2	1	7	168	0.222	0.333	0.2
Sangat Tinggi	0	0	9	169	0	0	0

Pada musim hujan, kategori Sedang menunjukkan performa terbaik dengan nilai POD sebesar 0,724 dan CSI sebesar 0,241. Artinya, sebagian besar kejadian TS teramati terjadi ketika SWEAT berada pada kategori menengah. Sebaliknya, kategori Tinggi dan Sangat Tinggi memiliki nilai CSI yang lebih rendah, meskipun secara teoritis merepresentasikan kondisi atmosfer yang sangat labil.

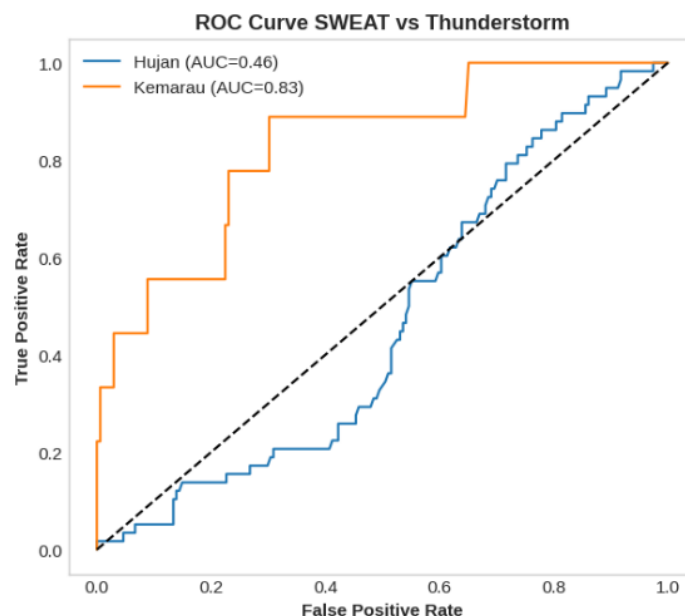
Pada musim kemarau, kategori Tinggi menjadi kategori yang paling representatif dengan nilai CSI sebesar 0,20 dan FAR yang lebih rendah dibandingkan kategori lainnya (Tabel 7). Atmosfer musim kemarau yang lebih stabil menyebabkan hanya kondisi dengan SWEAT tinggi yang cukup untuk memicu konveksi signifikan.

Hasil ini menunjukkan bahwa pendekatan kategorial lebih mampu menangkap perbedaan rezim atmosfer musiman dibandingkan penggunaan ambang tunggal.

Analisis ROC dan Kemampuan Diskriminatif SWEAT

Kemampuan diskriminatif SWEAT sebagai prediktor kejadian TS dianalisis menggunakan kurva *Receiver Operating Characteristic* (ROC) yang ditampilkan pada Gambar 3. Kurva ROC membandingkan laju deteksi benar (True Positive Rate) dan laju kesalahan positif (False Positive Rate) untuk berbagai nilai ambang SWEAT.

Nilai Area Under Curve (AUC) pada musim kemarau mencapai 0,83, yang menunjukkan bahwa SWEAT memiliki kemampuan diskriminatif yang baik dalam membedakan kondisi TS dan non-TS pada musim tersebut. Sebaliknya, nilai AUC pada musim hujan lebih rendah, yang mencerminkan tumpang tindih yang besar antara kondisi TS dan non-TS akibat tingginya variabilitas konveksi.

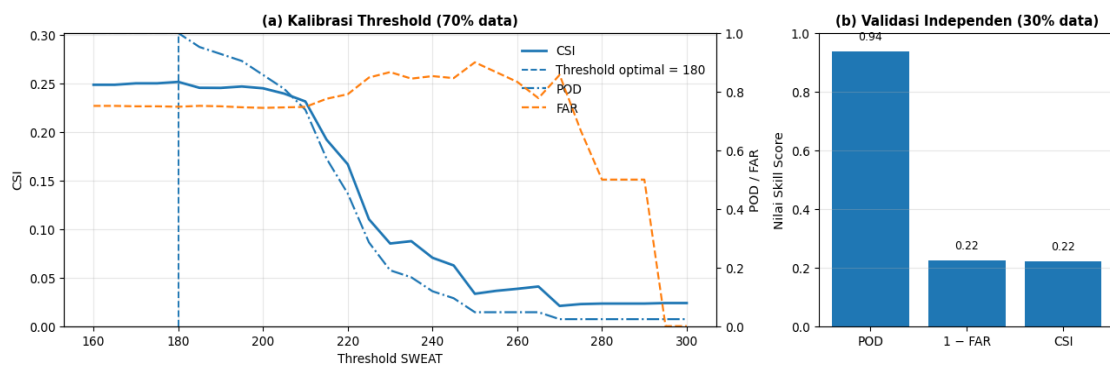


Gambar 3. Kurva ROC SWEAT VS THUNDESTORM
Musim Hujan dan Musim Kemarau

Ambang SWEAT optimal yang diperoleh dari analisis ROC berada pada kisaran nilai menengah, yang konsisten dengan hasil evaluasi kategorial. Temuan ini menegaskan bahwa nilai SWEAT ekstrem tidak selalu optimal sebagai indikator operasional, khususnya di wilayah tropis maritim.

Kalibrasi dan Validasi *Threshold* SWEAT Berbasis Musiman

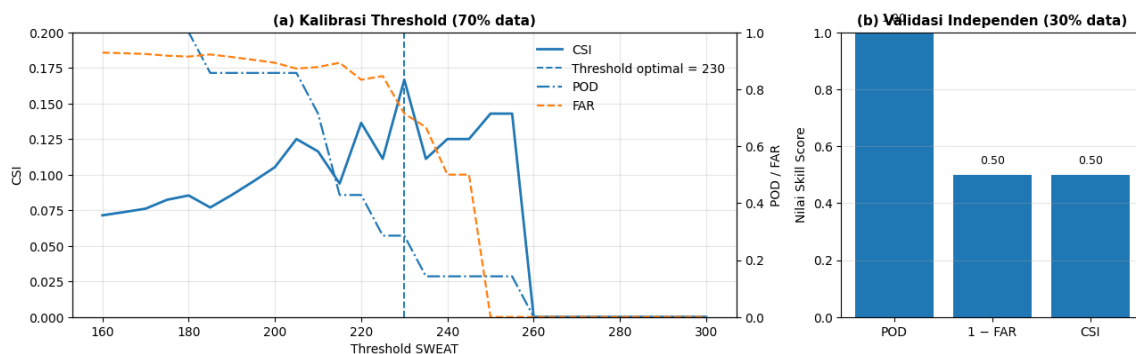
Proses penentuan *threshold* SWEAT dalam penelitian ini dilakukan menggunakan pendekatan kalibrasi dan validasi internal, dengan pembagian data menjadi 70% untuk tahap kalibrasi dan 30% untuk tahap validasi independen. Pendekatan ini bertujuan untuk memperoleh ambang SWEAT yang tidak hanya optimal secara statistik, tetapi juga memiliki kemampuan generalisasi yang baik terhadap data yang tidak digunakan dalam proses penentuan *threshold*.



Gambar 3. Kalibrasi dan validasi *threshold* SWEAT untuk kejadian *thunderstorm* pada musim hujan.

Hasil kalibrasi dan validasi *threshold* SWEAT untuk musim kemarau dan musim hujan ditunjukkan pada Gambar 3 dan Gambar 4. Panel (a) pada masing-masing gambar menampilkan hubungan antara nilai *threshold* SWEAT terhadap *Critical Success Index* (CSI), *Probability of Detection* (POD), dan *False Alarm Ratio* (FAR) pada tahap kalibrasi. Panel (b) menampilkan nilai POD, 1-FAR, dan CSI hasil validasi menggunakan data independen (30%) pada *threshold* terpilih.

Pada musim kemarau (Gambar 3), nilai CSI hasil kalibrasi meningkat seiring kenaikan *threshold* SWEAT dan mencapai maksimum pada nilai sekitar 230. Pada rentang ini, POD masih berada pada nilai tinggi, sementara FAR mulai menurun secara signifikan. Hasil validasi independen menunjukkan bahwa *threshold* SWEAT = 230 menghasilkan POD = 1,00 dan CSI = 0,50, yang mengindikasikan kemampuan deteksi *thunderstorm* yang sangat baik dengan tingkat kesalahan yang masih dapat diterima. Penurunan CSI pada *threshold* yang lebih tinggi menunjukkan bahwa peningkatan SWEAT yang terlalu ekstrem justru mengurangi kemampuan deteksi karena kejadian *thunderstorm* menjadi semakin jarang.



Gambar 4. Kalibrasi dan validasi *threshold* SWEAT untuk kejadian *thunderstorm* pada musim kemarau.

Sebaliknya, pada musim hujan (Gambar 4), nilai CSI maksimum pada tahap kalibrasi tercapai pada *threshold* SWEAT yang lebih rendah, yaitu sekitar 180. Hal ini menunjukkan bahwa pada musim hujan, kejadian *thunderstorm* dapat terjadi meskipun nilai SWEAT tidak terlalu tinggi. Hasil validasi menunjukkan bahwa *threshold* SWEAT = 180 menghasilkan POD sebesar 0,94 dengan CSI sebesar 0,22. Meskipun FAR relatif tinggi, nilai POD yang besar menunjukkan bahwa SWEAT tetap memiliki kemampuan deteksi yang baik terhadap kejadian *thunderstorm* pada musim hujan.

Perbedaan *threshold* optimal antara musim hujan dan kemarau menunjukkan bahwa penggunaan satu *threshold* SWEAT sepanjang tahun kurang representatif untuk mengidentifikasi potensi *thunderstorm*. Kondisi ini terutama relevan di wilayah tropis maritim yang memiliki variasi karakteristik termodinamika dan dinamika atmosfer antarmusim. Berdasarkan hasil kalibrasi dan validasi, penerapan *threshold* SWEAT yang berbeda untuk setiap musim berpotensi menghasilkan identifikasi kejadian *thunderstorm* yang lebih sesuai dengan karakteristik atmosfer setempat.

Berdasarkan hasil kalibrasi dan validasi musiman, penelitian ini mengusulkan kategori SWEAT baru yang bersifat adaptif musiman. Penetapan kategori tidak didasarkan pada satu nilai ambang tunggal, melainkan pada rentang SWEAT yang terbukti paling representatif dalam mendeteksi kejadian *thunderstorm* pada masing-masing musim.

Tabel 5. *threshold* SWEAT adaptif musiman di Bali

Kategori	Rentang SWEAT	Makna Fisik
Rendah	< 180	Atmosfer relatif stabil
Menengah-Hujan	180 – 200	TS potensial pada musim hujan
Menengah-Kemarau	220 – 240	TS potensial pada musim kemarau
Tinggi	> 240	TS jarang, bergantung pemicu mesoskal

Kategori Menengah–Hujan menunjukkan bahwa kondisi atmosfer yang lembap dan labil pada musim hujan memungkinkan terjadinya konveksi dalam meskipun nilai SWEAT berada pada tingkat menengah. Sebaliknya, kategori Menengah–Kemarau merepresentasikan kondisi ketika nilai SWEAT yang relatif lebih tinggi diperlukan untuk mendukung terjadinya *thunderstorm* di tengah stabilitas atmosfer musim kemarau. Sementara itu, kategori Tinggi (>240) tidak selalu berkorelasi langsung dengan kejadian *thunderstorm* di permukaan, khususnya pada musim hujan, karena tingginya nilai SWEAT yang mencerminkan potensi labilitas atmosfer belum tentu memicu konveksi aktif apabila terdapat keterbatasan mekanisme pemicu skala meso atau dinamika lokal.

SIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa *Severe Weather Threat* (SWEAT) Index memiliki kemampuan dalam mendeteksi kejadian *thunderstorm* di wilayah Bandar Udara I Gusti Ngurah Rai, tetapi kinerjanya dipengaruhi oleh variasi musiman. Frekuensi *thunderstorm* lebih tinggi pada musim hujan (25,4%) dibandingkan musim kemarau (5,62%), dengan nilai SWEAT rata-rata dan maksimum yang juga lebih tinggi pada musim hujan. Penggunaan satu *threshold* SWEAT sepanjang tahun kurang efektif, terutama pada musim hujan yang ditandai oleh nilai False Alarm Ratio (FAR) tinggi dan Critical Success Index (CSI) rendah. Pendekatan kategorial menunjukkan bahwa kategori SWEAT menengah lebih representatif pada musim hujan, sedangkan kategori tinggi lebih optimal pada musim kemarau. Analisis ROC menunjukkan kemampuan diskriminatif yang baik pada musim kemarau dengan AUC sekitar 0,83, meskipun kemampuan tersebut lebih terbatas pada musim hujan. Hasil kalibrasi

menghasilkan *threshold* optimal sekitar 180 pada musim hujan dan 230 pada musim kemarau, dengan validasi independen menunjukkan kinerja deteksi yang baik, terutama pada musim kemarau dengan CSI mencapai 0,50. Dengan demikian, penerapan *threshold* SWEAT adaptif secara musiman lebih representatif dibandingkan penggunaan *threshold* tunggal dan berpotensi meningkatkan pemanfaatan SWEAT Index sebagai indikator pendukung deteksi *thunderstorm* di lingkungan tropis maritim.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (STMKG) serta Stasiun Meteorologi Kelas I Gusti Ngurah Rai, Bali, atas dukungan, fasilitas, bantuan, dan penyediaan data yang diberikan selama pelaksanaan penelitian. Dukungan dari kedua institusi tersebut sangat membantu dalam proses pengumpulan, pengolahan, dan analisis data, sehingga penelitian mengenai evaluasi dan kalibrasi musiman *Severe Weather Threat* (SWEAT) Index terhadap kejadian *thunderstorm* di Bandar Udara I Gusti Ngurah Rai dapat terlaksana dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Budiarti, M., Hermawan, E., & Prasetyo, S. (2012). Pemanfaatan indeks stabilitas atmosfer untuk prakiraan badai guntur di wilayah Cengkareng. *Jurnal Meteorologi Dan Geofisika*.
- Ebert, E. E., Wilson, L. J., Brown, B. G., Nurmi, P., Brooks, H. E., Bally, J., & Ghelli, A. (2013). *Methods for verifying precipitation forecasts* (Number WMO-No. 1173).
- Fadholi, A. (2012). *Meteorologi sinoptik*. Graha Ilmu.
- Lubis, N. (2024). Analytical hierarchy process study of atmospheric stability indicators for aviation weather prediction. *Climago*.
- Lubis, N. A.-Z., Hasibuan, A. A., & Siregar, D. C. (2020). Kajian stabilitas atmosfer di Bandara Sultan Iskandar Muda Banda Aceh. *Jurnal Material Dan Energi Indonesia*, 10(1), 1–9.
- Miller, R. C. (1972). Notes on analysis and severe storm forecasting procedures. *Air Weather Service Technical Report*.
- Nugraha, A., Putra, Y. S., & Adriat, R. (2021). Analisis potensi terjadinya *thunderstorm* menggunakan metode SWEAT di Stasiun Meteorologi Supadio. *Prisma Fisika*, 9(1), 55–61.
- Organization, W. M. (2018). *Guide to aeronautical meteorological services*. World Meteorological Organization.
- Rusdin, A. A., Palloan, P., Subaer, & Prasetyo, A. (2023). Uji akurasi ambang batas indeks stabilitas atmosfer terhadap pembentukan *thunderstorm* dan awan cumulonimbus di Stasiun Meteorologi Kelas I Sultan Hasanuddin. *Jurnal Fisika Unand*, 12(2), 268–274. <https://doi.org/10.25077/jfu.12.2.268-274.2023>
- Tjasyono, B. T., Harijono, S. W. B., & Nurjani, E. (2011). *Meteorologi Indonesia: Karakteristik dan sirkulasi atmosfer*. Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.
- Yulihastin, E. W., Trismidianto, & Nugroho, J. T. (2023). Karakteristik konveksi dan hujan ekstrem di wilayah maritim Indonesia. *Jurnal Meteorologi Dan Geofisika*.